

环境条件对遵义市呼吸系统疾病的影响及预测研究

乐 满¹, 王式功^{2,1*}, 谢佳君³, 马 盼², 尚可政¹ (1. 兰州大学大气科学学院, 气象环境与人体健康研究中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 贵州省遵义市气象局, 贵州 遵义 563000)

摘要: 为探究气象和空气污染等环境条件对呼吸系统疾病发病的影响, 为遵义地区相关疾病预防提供科学依据, 采用分布滞后非线性模型和广义线性、相加模型, 利用当地气象和污染资料, 分析了 2012–2016 年遵义市气象环境要素对呼吸系统疾病发病的影响。结果显示, 遵义市呼吸系统疾病发病状况与当地长期气候状态基本保持一致, 气候效应对其的影响占主导作用, 其中, 冬季为呼吸系统疾病高发期, 立秋至处暑前后其发病人数最少, 表明此时间段内当地气候条件对呼吸系统疾病患者有气候疗养效应。气温对呼吸系统疾病发病的影响以低温滞后效应为主, 在其敏感阈值附近气温每变化 1℃, 发病人数将累积增加 31.6% (95%CI: 4.4%~65.8%); 气压以高压滞后效应为主, 相对湿度则在低湿部分同时有即时和滞后效应。舒适度对呼吸系统疾病的影响, 在冷、热斜胁迫下其发病人数明显多于舒适状况时。PM_{2.5}、SO₂ 和 NO₂ 三种污染物的影响都以即时效应为主, 而 CO 则在累积滞后 lag04 时相对危险度最高, PM_{2.5} 与呼吸系统疾病发病人数的暴露–反应曲线呈单调线性分布, SO₂、NO₂ 和 CO 均为“J”型分布。低温与高浓度 NO₂ 或者低湿与高浓度 SO₂ 的协同作用对呼吸系统疾病的影响较大。建立的全年和季节多元逐步回归方程的试预报准确率在 75% 以上 (夏季除外), 其中分季节建模预测效果显著优于全年预测效果。

关键词: 环境条件; 气象因子; 空气污染; 呼吸系统疾病

中图分类号: X503.1.P49 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)11-4334-14

Study about the impact of environmental conditions on respiratory diseases and prediction in Zunyi City. YUE Man¹, WANG Shi-gong^{2,1*}, XIE Jia-jun³, MA Pan², SHANG Ke-zheng¹ (1.Center for Meteorological Environment and Human Health, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3.Zunyi Meteorological Bureau, Guizhou, Zunyi 563000, China). *China Environmental Science*, 2018,38(11): 4334~4347

Abstract: To explore environmental impacts such as the meteorological and air pollution factors on respiratory diseases and to provide scientific basis for the prevention of these diseases in Zunyi City, distributed lag non-linear model together with generalized linear and additive models are applied to analyse the exposure-response relationship between environmental factors and respiratory diseases from 2012 to 2016 in Zunyi City. Results show that the changes in respiratory diseases are mainly consistent with the local long-term climatic conditions, and the impact of climate change is dominant. Winter and spring are the peak periods with high respiratory diseases number, and during the Start of Autumn and Stopping the heat periods, the respiratory diseases number is the lowest, indicating that local climatic conditions have positive climatic effects on patients with respiratory diseases during this time period. The impact of temperature on respiratory disease is mainly low-temperature lagged effect with the patients increasing by 31.6% (95%CI: 4.4%~65.8%) if the temperature changes by 1℃. The pressure mainly has the high-pressure lagged effect on respiratory diseases, while the relative humidity has both immediate and lagged effects in lower humidity. The number of respiratory diseases is significantly higher under cold and hot uncomfortable levels than that of comfort levels. PM_{2.5}, SO₂, and NO₂ mainly show immediate effects on respiratory diseases, while the CO had the highest risk if lagged for four days. The exposure-response relationship between respiratory diseases and PM_{2.5} shows an monotonously linear distribution, while that of SO₂, NO₂, and CO are J-type distribution, and the synergistic effects between low temperature and high concentration NO₂ or low humidity and high concentration SO₂ both have significant impact on respiratory diseases. The accuracy of annual and seasonal regression equations is over 75% (except for summer equation), and the seasonal equations' prediction effect is better than that of the annual equation.

Key words: environmental conditions; meteorological factors; air pollution; respiratory diseases

研究表明,气象条件的变化和空气污染的日益加剧与人们的健康息息相关^[1-12]。全球气候变化对人类健康产生的直接或间接的影响进一步加剧^[13-14],导致相关天气敏感性疾病发病率、乃至超额死亡率增加,如高温热浪等近年来造成大量人数死

收稿日期: 2018-04-19

基金 项目: 国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项 (2016YFA0602004); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目 (91644226); 国家基础科技条件平台建设项目 (NCMI—SBS17—201707、NCMI—SJS15—201707)

* 责任作者, 教授, wangsg@lzu.edu.cn

亡^[15-18].同时,空气污染对人类健康的影响^[19-22]也越来越受到国际的关注,研究发现^[23-24],受大气污染的影响,呼吸系统疾病、心脑血管疾病及癌症的发病率及死亡率逐年升高.但是多数研究主要着眼于易出现较极端环境条件的区域如京津冀或南京等展开天气敏感性疾病的研究,对于气候环境条件较温和区域的不良健康影响评估却较为缺失.因此,文章以遵义市作为研究目标区域,探索气象因子和空气污染等环境条件对呼吸系统疾病发病与流行的影响,并建立预报模型,不仅能够为促进当地合理的开展健康气候疗养提供科学依据,也可为这些区域更好的开展应对气候变化和空气污染提供科学参考,对目前医学气象学的研究进行补充.

1 资料与方法

1.1 资料

气象资料:遵义市 12 个观测台站的 2012~2016 年的地面日均气象资料,包括气温、气压、相对湿度和风速等气象要素.

污染资料:遵义市五个污染观测站点的 2014 年 1 月 1 日~2016 年 12 月 31 日的逐时观测资料以及由国家环境保护部网站(<http://www.zhb.gov.cn>)提供的日均资料,主要包括 AQI 指数、首要污染物、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂ 等污染因子变量.

疾病资料:遵义市 2012 年 1 月 1 日~2016 年 12 月 31 日播州区各医院就诊病案记录,其中包含 2 家省直属三级甲等综合医院和 4 家贵州省二级甲等综合医院,病案记录中主要包括患者家庭住址、就诊日期、患者年龄、性别、疾病诊断和就诊医院等基本信息.根据国际疾病分类标准第 10 版(ICD-10)^[25],共挑选出呼吸系统疾病就诊病例资料 264347 例,并对呼吸系统(ICD-10 编码:J00-J99)疾病资料进行分类整理,分别挑选上呼吸道感染和下呼吸道感染两类疾病资料进行分析.

气象资料和大气污染物浓度资料均来自正规网站系统,并有专人负责检查、判别及管理,最终的资料无缺测.疾病资料涵盖范围广,且与京津冀和北上广等区域多流动人口不同,遵义市研究对象基本为常住人口,因而疾病资料对当地而言更具代表性,并剔除了年龄、性别等信息不全和非遵义市居住的人群疾病资料,从而保证研究资料的准

确性和可靠性.

1.2 方法

文章利用 DLNM(分布滞后非线性模型)、GLM(广义线性模型)和 GAM(广义相加模型)进行分析.其中 DLNM 模型可灵活地描述气温健康效应的空间和其发生的滞后维度同时变化的影响^[26-28],其核心是二维空间交叉基的构建,而 GLM 模型^[29]主要假设连接函数与预测变量之间的关系为线性关系.GAM 模型则是在没有选择特定响应函数的情况下使用.在控制了时间趋势、星期几效应和节假日效应的前提下:选择相对危险度(RR)作为主要的表征量,利用 DLNM 和 GLM 模型进行气象因子与相关天气敏感性急病发病的关系研究,GAM 模型则进行空气污染对呼吸系统疾病的影响及环境因子之间的协同效应分析.以上模型参数自由度的选择采用赤池信息准则(Akaike's Information Criterion,AIC).

文章在构建呼吸系统疾病预测模型、进行预测模型优度检验时,分别选取平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对百分误差(MAPE)、预测准确率(P)四种参数进行验证,其中 y 和 y' 表示实测值和预测值, n 表示样本数量,计算方法如下:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|,$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2\right)} \quad (1)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - y'_i|}{|y_i|} \right),$$

$$P = \left(1 - \frac{\text{MAE}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

主要利用 R 语言编程软件和 SPSS 软件进行分析研究.

2 结果与分析

2.1 呼吸系统疾病发病人数和环境要素的描述性统计及相关性分析

遵义市属亚热带季风性气候,地形起伏大,地貌类型复杂,其平均气温较为舒适为 16.1℃,平均相对湿度接近 80%,平均风速较小.整体上空气质量较好,各污染物浓度较低,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的年均浓度分别为 47.4、78.0、17.1 和 30.4 μg/m³(表 1).

表 1 呼吸系统疾病就诊人数与主要环境要素的描述性分析

Table 1 The statistical description of respiratory diseases visits and environmental elements

类别	平均值	百分位数				
		5 th	25 th	50 th	75 th	95 th
总数(人)	144.7	86	114	139	170	222
女性(人)	56.7	23	38	53	73	101
男性(人)	64.1	31	48	62	79	104
上感(人)	46.6	28	37	45	55	70
下感(人)	51.6	22	37	50	63	89
平均气温(℃)	16.1	3.5	9.5	17.1	22.5	27.3
最高气温(℃)	20.2	5.6	13	21.2	27.4	33
最低气温(℃)	13.4	1.7	7.2	14.3	19.3	23.2
平均气压(hPa)	925.6	915.8	920.3	925.2	930.5	936.6
相对湿度(%)	79.8	63.4	73.8	80.8	86.9	92.3
平均风速(m/s)	1.3	0.8	1	1.2	1.5	2
水汽压(hPa)	15.6	6.2	9.4	15.4	21.3	25.9
PM _{2.5} (μg/m ³)	47.4	16	28	42	60	100
PM ₁₀ (μg/m ³)	78.0	31	51	72	96	153
SO ₂ (μg/m ³)	17.1	4	7	11	21	50
NO ₂ (μg/m ³)	30.4	17	23	30	36	48
CO(mg/m ³)	0.8	0.5	0.6	0.8	0.9	1.2

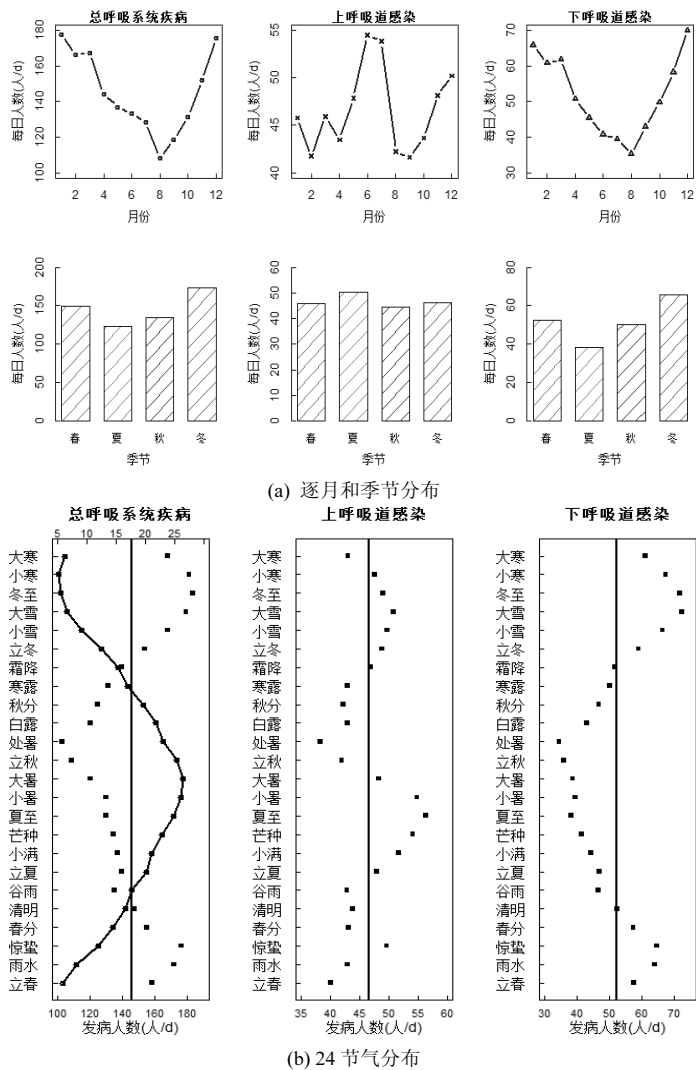


图 1 遵义市呼吸系统疾病发病人数的不同时间尺度分布

Fig.1 The distribution of respiratory diseases number in Zunyi City at different time scales

图 1 为不同时间尺度遵义市总呼吸系统、上呼吸道感染和下呼吸道感染(简称“上感”和“下感”,下同)发病人数的分布特征.从季节分布情况看,冬春季为遵义市呼吸系统疾病高发期,与多数北方城市呼吸系统疾病高发期在秋冬季有所不同,且在 12、1、2 和 3 月较多,8 月份最少为 102.3 人/d,下呼吸道感染发病人数变化特征与之一致.上呼吸道感染的就诊人数在夏季和冬季最多,需引起注意.

我国 24 节气的划分充分考虑了季节、气候和物候等自然现象的变化,在注重气象因素的同时也考虑了气候因素,对于人们根据中医理论进行养生防病具有更好的指导意义.图 1(b)为 24 节气呼吸系统疾病发病人数分布(图中黑色曲线为不同节气的气温分布,黑色竖实线为发病人数年均值):呼吸系统疾病发病第一高峰期出现在隆冬季节的大雪至小寒期间,次峰期出现在冬末春初的雨水到惊蛰期间;而夏末的立秋至处暑前后遵义市呼吸系统疾病发病人数最少(102.7 人/d),表明此时间段内当地气候条件对呼吸系统疾病患者有气候疗养效应.与 24 节气的气温分布对比,发现呼吸系统疾病发病人数与气温呈现相同周期的反相位变化,可见遵义市呼吸系统疾病发病主要与当地长期气候状态保持一致,气候效应对其的影响占主导作用,注意到上呼吸道感染 24 节气发病人数主要夏至时达到最多(56.3 人/d),在秋冬之后发病人数也逐渐增加,可见上呼吸道感染同时受到外界高温、低温和粉尘的显著影响.

表 2 呼吸系统疾病发病人数与主要环境因子的 Spearman 相关

变量	总呼吸	女性	男性	上感	下感
平均气温(℃)	-0.428**	-0.251**	-0.292**	0.083**	-0.465**
平均气压(hPa)	0.285**	0.212**	0.225**	-0.120**	0.385**
相对湿度(%)	0.042	0.015	0.007	-0.018	0.072**
平均风速(m/s)	-0.122**	-0.110**	-0.112**	-0.035	-0.155**
水汽压(hPa)	-0.419**	-0.243**	-0.290**	0.091**	-0.451**
PM _{2.5} (μg/m ³)	0.195**	0.048	0.124**	-0.137**	0.215**
PM ₁₀ (μg/m ³)	0.164**	0.020	0.102**	-0.080**	0.156**
SO ₂ (μg/m ³)	0.309**	0.115**	0.192**	-0.095**	0.315**
NO ₂ (μg/m ³)	0.197**	0.150**	0.172**	-0.073*	0.249**
CO(mg/m ³)	0.323**	0.376**	0.333**	0.013	0.356**

注:“**”和“*”分别表示通过了显著性水平 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,下同.

表 2 为环境因子与遵义市呼吸系统疾病发病人

数的 Spearman 相关表,污染因子变量主要与呼吸系统疾病发病人数呈显著正相关,表明污染物浓度的增加会明显导致呼吸系统发病人数的上升;总呼吸和下感疾病发病人数与气压呈显著正相关,与气温、风速等均呈显著负相关,上感发病人数与气温和水汽压呈正相关.

2.2 气象因子对呼吸系统疾病发病的影响与滞后性

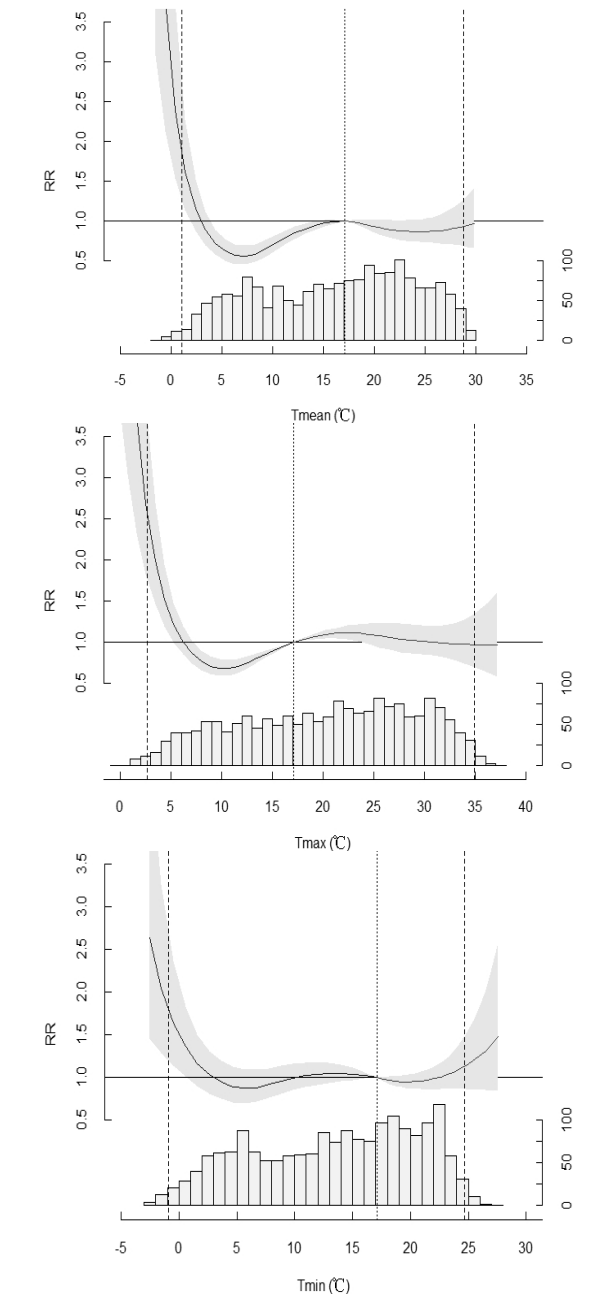


图 2 平均气温、最高和最低气温滞后 0~14d 时对呼吸系统疾病的影响和频数分布

Fig.2 The effect of mean temperature, maximum and minimum temperature lagged 0~14days on respiratory diseases and frequency distribution

2.2.1 气温对呼吸系统疾病发病的影响 考虑到疾病对气象要素的敏感性存在滞后效应,且一般一个完整的天气过程时长约为 1~2 周左右,故而考虑最长累积滞后时长为 14d,即共考虑最长累积滞后时长为 15d,以平均气温的中位数 17.1℃作为模型参考温度,并以此为分界点(图 2 中的中间竖虚线)分别讨论温度小于和大于该温度时的冷效应和热效应.

图 2 中灰色区域为 95%的置信区间,两侧竖虚线分别为各气温指标的 1%和 99%分位数.气温对遵义市总呼吸系统疾病发病的累积滞后效应相似:整体上呈“反 J”型分布,主要以冷效应为主,当气温持续下降低于 7℃左右时,RR 几乎以指数形式增长迅速增大,对呼吸系统疾病发病的危害显著增加;热效应部分对遵义市呼吸系统疾病发病的影响不大,其 RR 值接近于 1.

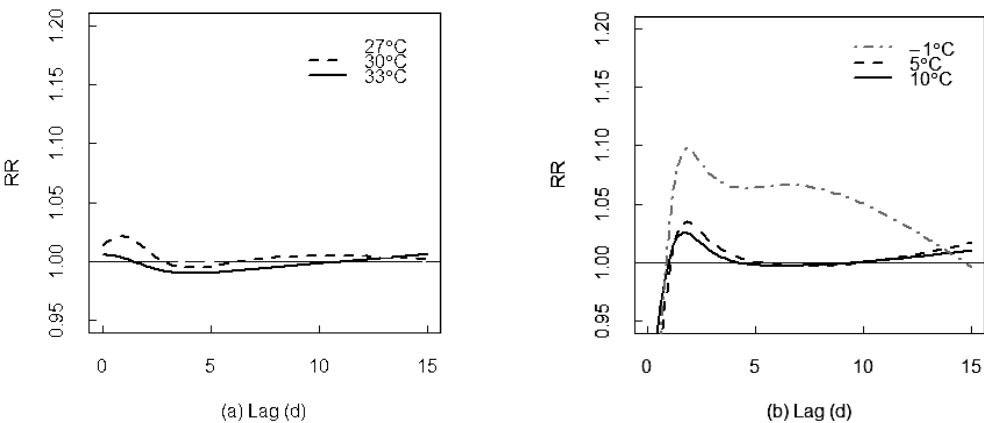


图 3 不同气温对呼吸系统疾病发病的滞后效应
Fig.3 The lagged effect of different temperatures on the respiratory diseases

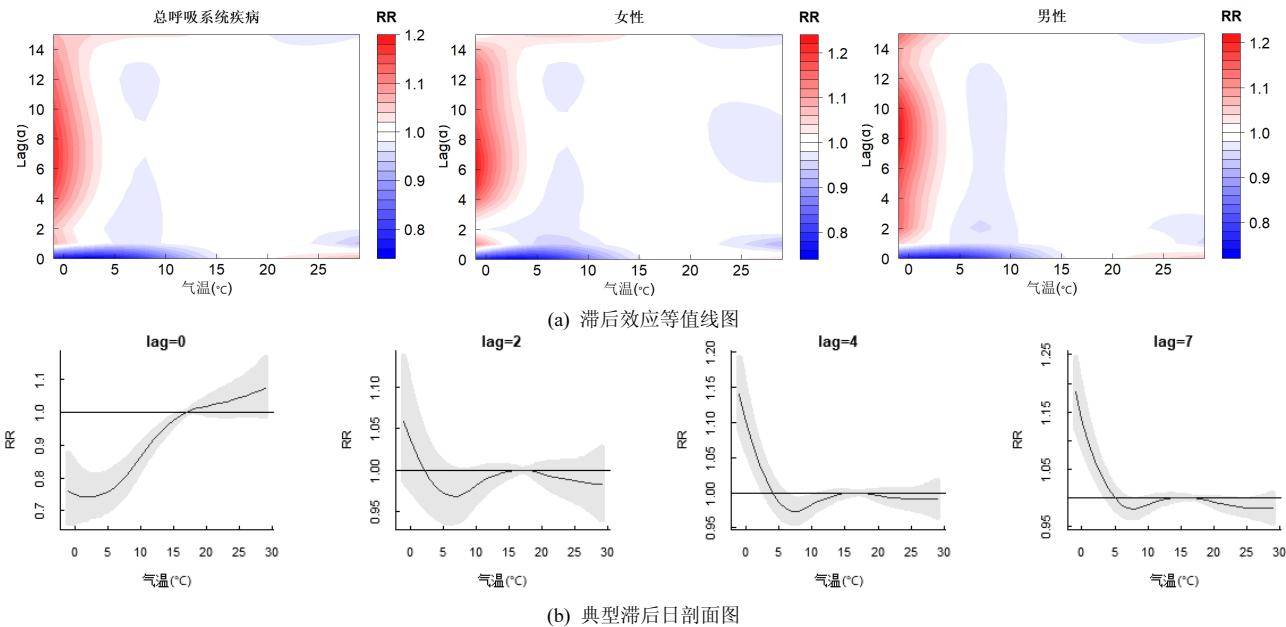


图 4 平均气温对不同性别呼吸系统疾病发病的滞后效应
Fig.4 The lagged effect of mean temperature on respiratory diseases of different genders

为探究高温和低温对呼吸系统疾病发病的滞后效应,分别选取日最高气温的 27℃、30℃、33℃和最低气温-1℃、5℃和 10℃分析其滞后影响(图 3).高温影响主要表现出即时效应,在累积滞后 1d 时对

呼吸系统疾病发病有显著影响;温度偏低且约在 lag=2~3 时对呼吸系统疾病的危害最大,尤其是气温在 0℃以下时,滞后效应可以累积到 14d 左右,温度越低其危害越大.同时,从频数分布(图 2)可以看到,遵

义市气温主要集中于 5~27℃ 之间,日最高气温高于 32℃ 和最低气温低于 0℃ 的占比均很小.因此,接下来的分析主要以平均气温为代表分析温度对不同性别人群发病的影响.

不同气温段的时间滞后差异明显(图 4(a)):平均气温对总呼吸系统疾病发病的影响以低温滞后效应为主,且低温对女性患者的影响主要在 lag=7 时达到最大,同时女性患者对低温的影响敏感性略低于男性患者.在滞后 0d 时(图 4(b))平均气温对呼吸系统疾病发病的影响主要以高温即时效应为主,低温效应不显著,当 lag=2 时,低温效应开始凸显,且随着滞后时间的延长其危险度进一步增加,对呼吸系统疾病发病有显著影响的低温温度也逐渐上升,因此遵义市低温滞后的持续效应对呼吸系统疾病发病影响持续时间较长.

表 3 低温和高温对呼吸系统疾病发病人数的影响统计表
Table 3 Statistical table of the effects of lower and higher temperature on the respiratory diseases number

项目	低温效应(1%, lag=09)			高温效应(99%, lag=0)		
	RR	RR _{left}	RR _{right}	RR	RR _{left}	RR _{right}
总呼吸	1.316	1.044	1.658	1.063	0.990	1.141
女呼吸	1.442	1.056	1.969	1.016	0.923	1.118
男呼吸	1.323	0.988	1.771	1.069	0.979	1.771
上感	1.829	1.272	2.631	1.106	1.009	1.212
下感	1.448	1.045	2.007	1.074	0.965	1.197

注:表中加粗部分表明通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,下同.

表 3 为平均气温的 1%和 99%分位数(1.1℃ 和 28.8℃)分别滞后 09d 和 0d RR 统计表,以研究其低温滞后效应和高温即时效应对呼吸系统疾病发病的影响.遵义市总呼吸系统疾病受低温滞后效应显著,低温每变化 1℃,相应的发病人数将累积增加 31.6%(95%CI: 4.4%~65.8%).上感发病情况则同时受到低温滞后和高温即时效应的显著影响,高温每升高 1℃,上感发病人数将增加 10.6%(95%CI: 0.9%~21.2%).此外,女性患者对低温累积滞后效应的响应比男性的更加敏感,需引起注意.

2.2.2 气压、风速和相对湿度对呼吸系统疾病发病的影响 选取平均气压、平均风速和相对湿度的中位数 925hPa、1.2m/s 和 80.0%为相应的参照标准分析对呼吸系统疾病发病的滞后效应.图 5 为平均气压、风速和相对湿度的滞后效应 RR 曲面图:平均气

压主要表现为高压效应,低压对呼吸系统疾病发病的影响不显著;同时,风速极小和极大时均表现为一定程度的即时效应,说明适当风速对呼吸系统疾病发病影响不大;相对湿度主要表现为低湿效应,且存在两个滞后

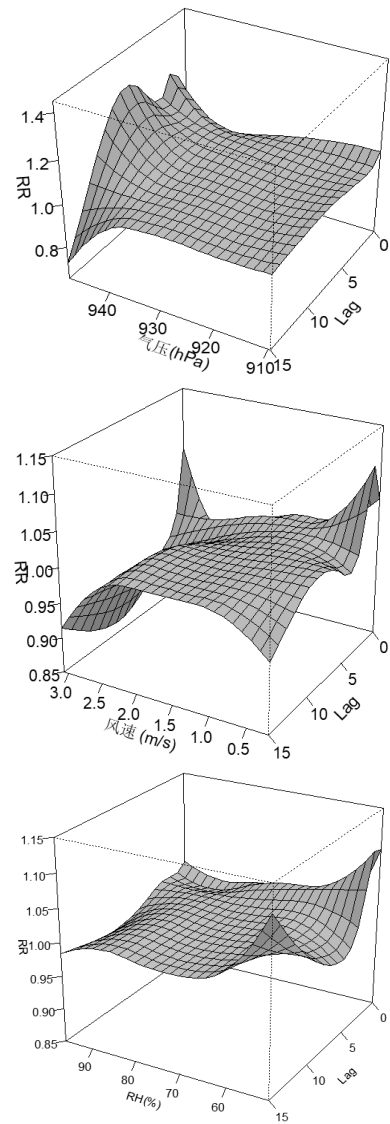


图 5 平均气压、风速和相对湿度对呼吸系统疾病发病的滞后效应 RR 曲面图

Fig.5 Relative risk(RR) plot of the lagged effect of mean pressure, wind speed and relative humidity on respiratory diseases

危险度峰值,第一峰值在滞后 2~3d 左右出现,第二滞后峰值则出现在 7~14d 左右,此时主要是相对湿度的变化会对病毒或细菌等的繁殖产生影响从而进一步诱发呼吸系统疾病发病,需引起重视,在高湿条件下,对遵义市呼吸系统疾病危害较小.

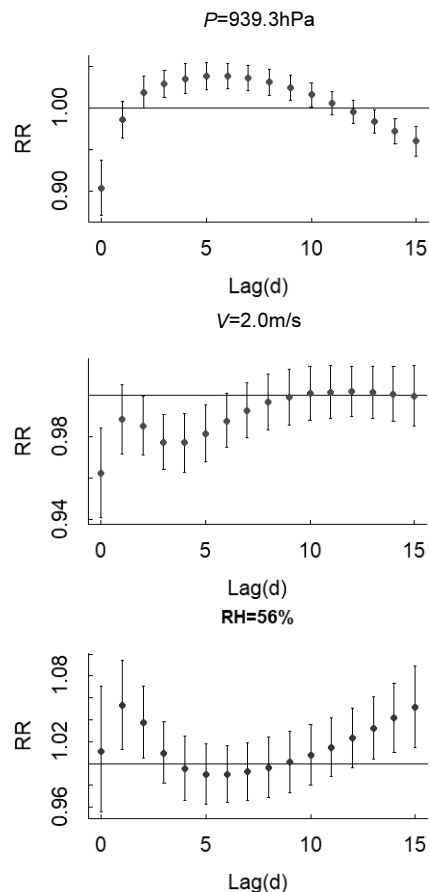


图6 平均气压、风速和相对湿度特定值的RR值随滞后时长的变化

Fig.6 The trend of RR with time of the specified values of mean pressure, wind speed and relative humidity

根据以上分析,分别选择气压 939.3hPa(99%分位数)、风速 2m/s(95%分位数)和相对湿度 56%(1%分位数)研究其对呼吸系统疾病发病的影响(图6):高压主要在滞后 3d 时对呼吸系统疾病发病有明显促进作用,且在 lag=6~7d 后危险度最高;风速的滞后效应仍然不显著,相对湿度的滞后效应随时间呈现“V”

型变化,低湿天气对呼吸系统疾病的影响同时具有即时和滞后效应。

根据图 6 结果,计算各因子的相应累积滞后效应(表 4):风速对呼吸系统疾病发病的效应整体不显著.高压低湿条件对女性群体有显著影响,气压每变化 1hPa 女性发病人数将累积增加 20.0%(95%CI: 5%~43.3%),相对湿度每减小一个单位,女性患者将累积增加 20.9%(95%CI:6.9%~37.0%),这两种因子对男性人群没有显著影响.上感和下感分别与高压和低湿条件有显著关系,此种气象条件下遵义市上呼吸道感染发病人数将增加 34.8%(95%CI:8.7%~ 66.9%),下感发病人数将增加 13.6%(95%CI:0.1%~ 29.4%).

表 4 遵义市高压、风速和低湿天气对呼吸系统疾病发病的影响

Table 4 Effects of high pressure, wind speed and low humidity on the respiratory diseases in Zunyi City			
项目	$P=939.3\text{hPa}(\text{lag}=09)$	$V=2\text{m/s}(\text{lag}=03)$	$\text{RH}=56\%(\text{lag}=03)$
总呼吸	1.151 (1.002~1.322)	0.911 (0.866~0.959)	1.109 (1.016~1.213)
女呼吸	1.200 (1.005~1.433)	0.898 (0.838~0.962)	1.209 (1.069~1.370)
男呼吸	1.077 (0.910~1.274)	0.931 (0.874~0.992)	1.056 (0.944~1.180)
上感	1.348 (1.087~1.669)	0.940 (0.877~1.001)	1.091(0.963~1.235)
下感	1.172 (0.968~1.419)	0.908 (0.843~0.977)	1.136 (1.001~1.294)

表 5 呼吸系统疾病发病人数与体感温度(T_g)的 Spearman 相关

Table 5 The Spearman correlations between the respiratory diseases and sensible temperature (T_g)					
体感温度	总呼吸	女性	男性	上感	下感
T_g	0.369**	0.357**	0.170**	-0.432**	0.333**
$T_{g\text{max}}$	0.844**	0.826**	0.619**	-0.881**	0.820**
$T_{g\text{min}}$	-0.951**	-0.935**	-0.815**	0.938**	-0.953**

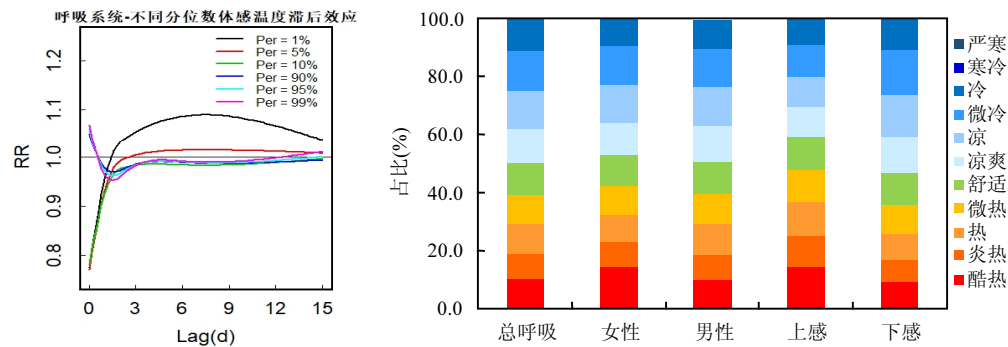


图 7 不同分位数体感温度滞后影响曲线(左)和不同舒适度等级^[31]发病人数的分布(右)

Fig.7 The curves of different quantile sensible temperatures' lagged effect(left) and the distribution of respiratory disease in different comfort levels(right)

2.2.3 舒适度对呼吸系统疾病发病的影响 多项研究表明呼吸系统疾病往往受多种气象因子的综合作用,因此选择综合考虑了温度、湿度等多种气象要素、基于黄金分割率的舒适度指数^[30-31]分析呼吸系统疾病发病对气象要素变化综合效应的响应情况.表 5 中体感温度与呼吸系统疾病发病具有显著相关性.

选取体感温度的 1%,5%和 10%百分位数研究其冷效应,选取 90%,95%和 99%百分位数研究其热效应,结果表明(图 7 左)低体感温度对呼吸疾病发病的滞后效应显著,体感温度越低,越容易引发呼吸系统疾病;高体感温度对呼吸系统疾病的影响主要为即时效应,随滞后时间增加其影响逐渐减小.整体上冷、热胁迫下呼吸系统疾病发病人数明显多于舒适情况(图 7 右).上感发病人数在热不舒适等级(微热、炎热、热和酷热等级,下同)约占 48.1%,远远大于舒适和冷不舒适等级各自所占比例,下感发病人数在冷不舒适等级所占比例远超舒适和热不舒适等级,约为 53.3%.

2.3 污染物浓度对呼吸系统疾病发病的影响与滞后性

研究表明,污染物对人体健康的影响存在一定的滞后和累积效应^[32-33].经过模型调试,GAM 模型具有较好的描述效果,因此本部分主要利用 GAM 模型探讨不同污染物浓度对呼吸系统疾病发病的滞后效应(图 8),图中各污染物浓度分别增加相应单位浓度时,呼吸系统疾病发病总人数增加的 ER%值及其 95%CI 置信区间,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,有统计学意义.

当遵义市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 增加相应浓度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,均在滞后 0d (lag0)与呼吸系统疾病就诊人数关联的 ER%值最大,然后逐渐减小,以即时效应为主,这是因为遵义市整体上空气质量优良率高,当地人群对空气污染恶化的情况较为敏感,当出现空气污染时随即就表现出不适应,从而表现为即时效应.CO 浓度增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时在累积滞后 0~4d (lag04)时 ER%值达到最大,此时对遵义市人体健康危害较大,即 CO 浓度对呼吸系统的危害主要为累积滞后效应.以上 4 种污染物浓度均增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,总呼吸系统发病人数将分别增加 0.09%,0.44%,0.37% 和 0.016%,可见在遵义市酸性污染物 SO_2 和 NO_2 对呼吸系统疾病的危害最大.

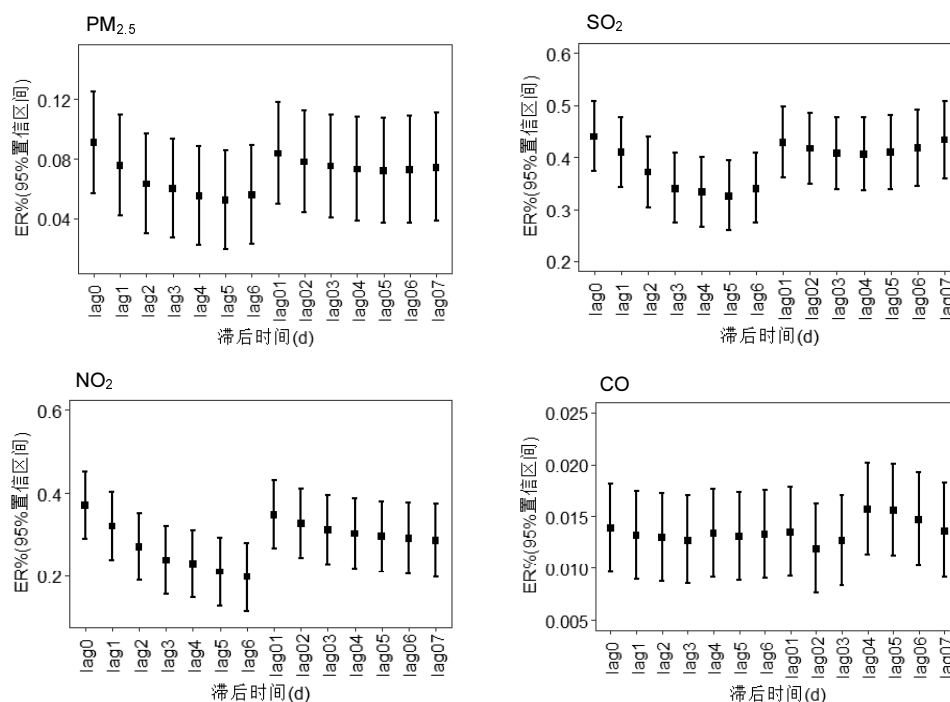


图 8 2014~2016 年遵义市污染物日均浓度增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,呼吸系统疾病发病人数在不同滞后条件下的增加百分比(ER%)及 95%的置信区间(95%CI)分布

Fig.8 The distribution of ER% and 95%CI of respiratory diseases under different lagging days if the pollutant concentrations increase $10\mu\text{g}/\text{m}^3$

从以上 4 种污染物在最敏感滞后条件下与呼吸系统疾病发病人数的暴露-反应关系图中(图 9)看到,PM_{2.5} 的 logRR 值曲线大致呈单调线性分布,随着其浓度的增加,RR 值逐渐增大,由于遵义市主要污染物为 PM_{2.5},因此需多加注意污染天气时呼吸系统疾病的预防.其余 3 种污染物 logRR 值均随着浓度的增加呈现“J”型分布,在较低浓度时,污染物对人体健康的危害较小,随着浓度的持续增高,logRR 值快速上升,对人体健康的风险进一步加大,同时对比 logRR 值大小发现 SO₂ 等酸性污染物对遵义市呼吸

系统疾病发病的影响最大.

表 6 为 4 种污染物对不同人群和不同类别呼吸系统疾病发病情况的影响:PM_{2.5}、SO₂ 和 CO 对女性健康的危害要高于男性,增加 10μg/m³ 时 ER%分别为 0.13%,0.63%和 0.024%,NO₂ 则相反.对比不同类别的呼吸系统疾病发现,上呼吸道感染发病人数主要对 SO₂ 酸性气体的浓度变化有显著反应,因为人体呼吸时最先受到刺激的为鼻、喉等部分,而下呼吸道感染则在一定程度上均受到以上 4 种污染物的显著危害.

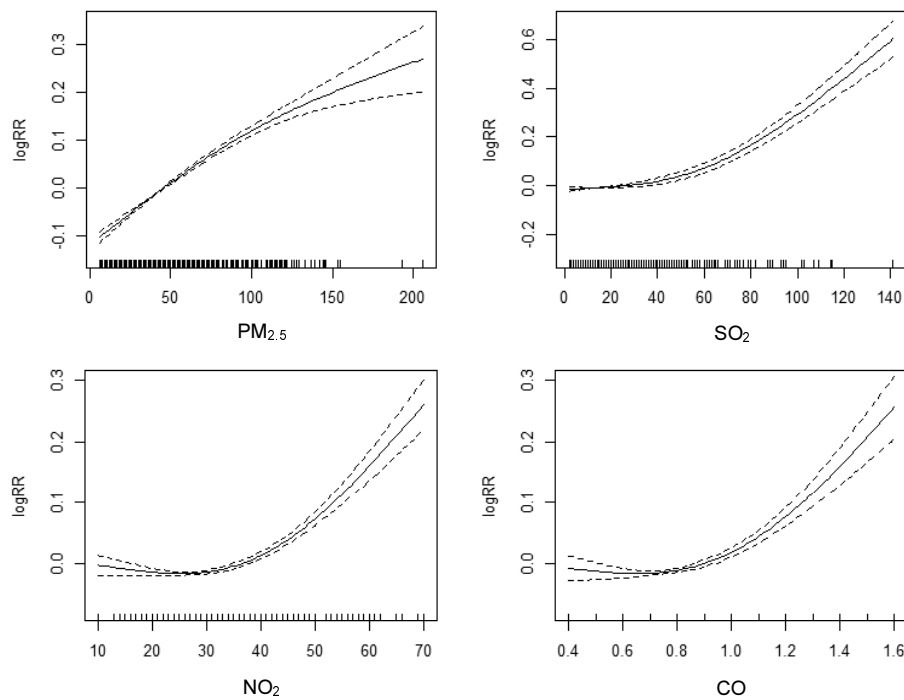


图 9 遵义市 4 种污染物在最敏感滞后条件下与呼吸系统疾病的暴露-反应关系图

Fig.9 Exposure-response relationship between respiratory diseases and the four pollutants under the most sensitive lagged conditions in Zunyi City

表 6 污染物浓度每增加 10μg/m³ 时呼吸系统疾病发病人数增加百分比(ER%)及 95%的置信区间(95%CI)的统计表
Table 6 Statistical table of ER% and 95% CI of respiratory diseases if the pollutant concentrations increase 10μg/m³

项目	ER%(95%CI)			
	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO
总呼吸	0.09(0.06~0.12)**	0.44(0.37~0.51)**	0.37(0.29~0.45)**	0.016(0.011~0.020)**
女呼吸	0.13(0.08~0.18)**	0.63(0.53~0.73)**	0.41(0.28~0.53)**	0.024(0.017~0.031)**
男呼吸	0.10(0.05~0.15)**	0.50(0.40~0.59)**	0.48(0.36~0.60)**	0.017(0.010~0.023)**
上感	-0.03(-0.09~0.03)	0.29(0.16~0.42)**	0.07(-0.01~0.22)	-0.001(-0.009~0.007)
下感	0.09(0.03~0.14)**	0.36(0.26~0.47)**	0.42(0.29~0.56)**	0.012(0.005~0.019)**

2.4 气象和空气污染因子协同效应对呼吸系统疾病发病的影响

由于不同气象条件对空气污染的形

有不同的影响,气象条件的改变可以通过影响大气中光化学反应从而影响大气中二次污染物的形成,间接影响人体健康.

表 7 2014~2016 年遵义市气象因子与污染物的 Spearman 相关性

Table 7 Spearman correlation between meteorological factors and pollutants in Zunyi City, 2014~2016

气象因子	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO ₂
<i>P</i>	0.250**	0.382**	0.213**	0.283**
<i>T</i>	-0.317**	-0.517**	-0.362**	-0.279**
<i>T</i> _{min}	-0.382**	-0.588**	-0.399**	-0.361**
<i>T</i> _{max}	-0.233**	-0.422**	-0.306**	-0.183**
RH	-0.314**	-0.326**	0.001	-0.222**
wind	-0.185**	-0.156**	-0.229**	-0.477**

表 7 为遵义市气象因子和空气污染变量之间的 Spearman 相关系数统计表,气象因子和空气污染变量之间呈显著相关性,表明二者之间存在固有的理化特征,且对人体健康的影响并不是单因素的,而是存在多因素的协同作用。

经模型计算分析,发现对遵义市呼吸系统疾病发病有显著影响的主要是气温和 NO₂、相对湿度和 SO₂ 之间的协同效应(表 8)。

从 β 系数分析,气温和 NO₂ 协同效应对女性人群的作用比男性强;RH 与 SO₂ 的协同作用则是对男

性患者的影响要大些,且对下呼吸道感染也有显著影响,但是对上呼吸道感染影响不显著。

表 8 气象因子和空气污染因子的协同效应对呼吸系统疾病发病的影响

Table 8 The synergistic effect of meteorological and air pollution factors on the respiratory diseases

项目	<i>T</i> +NO ₂		RH+SO ₂	
	β	<i>p</i>	β	<i>p</i>
总呼吸	-3.810	<0.01	-3.249	<0.01
女性	-3.183	<0.01	-1.993	<0.05
男性	-2.022	<0.05	-2.781	<0.01
上感	-2.248	<0.05	0.857	0.391
下感	-2.590	<0.01	-3.025	<0.01

图 10 中(a)-(c)和(d)-(f)分别为气温与 NO₂、RH 和 SO₂ 对呼吸系统疾病有显著协同作用的三维曲面图。整体上在低温、高浓度 NO₂ 的条件下,呼吸系统疾病发病人数最多,即当冬半年出现污染天气时,二者协同效应对呼吸系统疾病发病的影响增强,对上感和下感发病的影响与总呼吸基本一致。

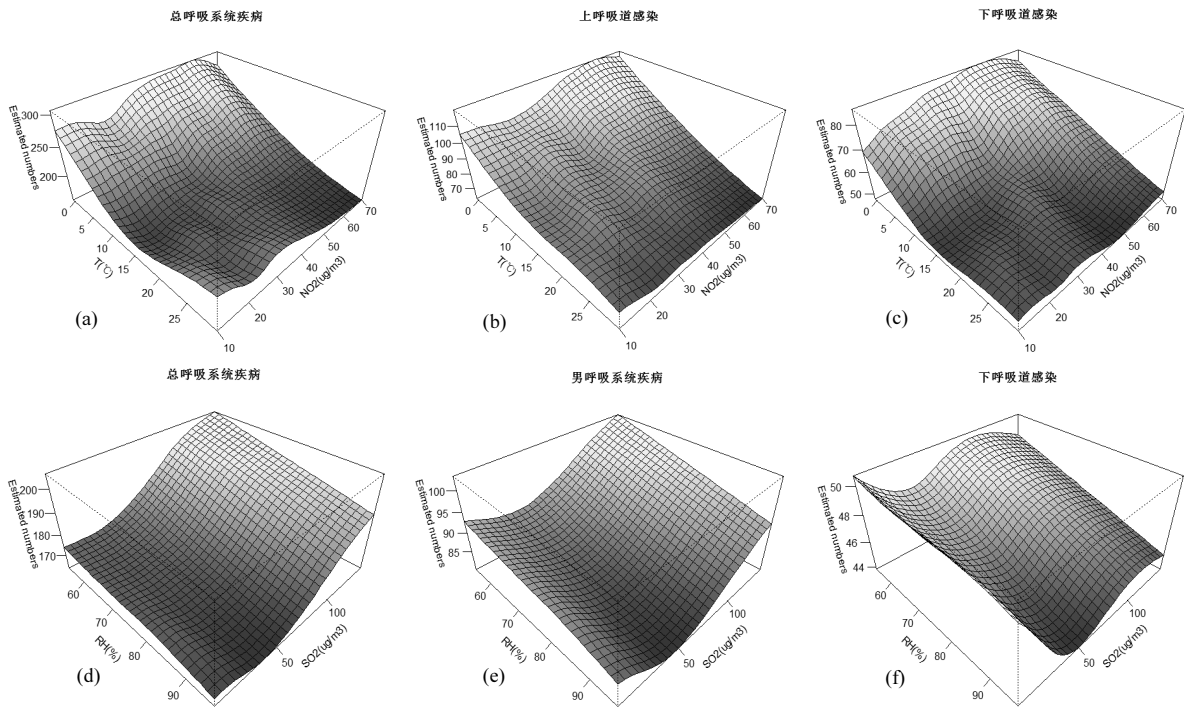


图 10 气象和空气污染因子的协同作用对呼吸系统疾病发病人数影响的平滑曲面图

Fig.10 The plots of synergistic effect of meteorological and pollution factors on the respiratory diseases

低湿、高浓度 SO₂ 的协同效应对遵义市呼吸系统疾病发病的影响最大,发病人数随着相对湿度减

小(或 SO₂ 浓度增加)逐渐增加。此外,男性患者对相对湿度与 SO₂ 之间的协同作用更敏感,且对低浓度

SO₂ 也较敏感(图 10(e));同时,低湿与高浓度 SO₂ 或低浓度 SO₂ 对下呼吸道感染发病均有显著影响.

2.5 呼吸系统疾病发病的预测模型研究

最后,文章采用多元逐步回归方法对遵义市 2014~2016 年呼吸系统疾病进行预测模型构建研究.

在进行逐步回归预报模型的构建中,根据环境因子与呼吸系统疾病发病的相关性,遴选出“气温、气压、相对湿度、风速”4 个基本气象因子和 PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 和 CO 等污染因子变量.并充分考虑滞后效应,对挑选出的环境因子变量相对于患者发病时

间进行提前一周考虑,对所选的气象因子分别考虑单滞后和累积滞后一周考虑,在累积滞后的基础上再次进行单滞后一周,即考虑累积滞后时所用到的因子可追溯到两周前,这与大气行星尺度的天气变化周期相对应,即将大尺度天气过程的变化周期也予以了考虑,更合理地研究其与疾病发病与流行的关系.污染因子则仅考虑其单滞后效应.最后共派生出 416 个可能的影响因子进行逐步回归,构建预报方程,优选出参与构建预报方程的因子变量及物理意义统计如表 9:

表 9 优选出的因子变量及物理意义
Table 9 The selected factor variables and their physical significance

因子序号	物理意义	因子序号	物理意义	因子序号	物理意义	因子序号	物理意义
X30	(RH4)0	X240	(ΔT72)5	X373	(CO)0	X397	(CO)4
X105	(ΔTT72)2	X246	(P3)5	X379	(CO)1	X402	(SO2)5
X116	(ΔPP24)2	X277	(T1)6	X383	(PM10)2	X403	(CO)5
X163	(ΔPP48)3	X285	(ΔT48)6	X385	(CO)2	X409	(CO)6
X202	(P5)4	X333	(ΔTT24)7	X388	(PM2.5)3	X412	(PM2.5)7
X203	(P6)4	X335	(ΔTT72)7	X392	(NO2)3	X415	(CO)7
X234	(T4)5						

注: (X_{d1})^{d2} 为气象因子X连续d1天内进行平均,同时相对发病人数提前考虑d2天;(X^{d2})^{d2} 为污染因子X单滞后d2天,相对发病人数提前考虑d2天;(ΔX₂₄)^{d2}、(ΔX₄₈)^{d2}、(ΔX₇₂)^{d2} 分别为当天和前天的要素值之差,当天和前两天的要素值之差,... ,以此类推,即不考虑日变化的要素变幅,同时相对发病人数提前考虑d2天;(ΔXX₂₄)^{d2}、(ΔXX₄₈)^{d2}、(ΔXX₇₂)^{d2} 分别为当天的变幅,连续两天的变幅,连续三天的变幅,即是考虑了日变化之后的各因子最大变幅,相对发病人数提前考虑d2天.表中,各气象因子单位分别为:T(℃),P(hPa),RH(1),W(m/s).

选取遵义市 2014~2015 年共两年的数据资料构建逐步回归预报模型,以 2016 年的数据作为试预报验证.此外,在建立不同季节的回归方程时,考虑到滞后效应以及逐季节预报方程转换时会产生不连续的问题,故在构建逐季节预报方程的过程中将每个季节的疾病和气象资料均向前和向后延伸半个月从而保证月际之间要素的连续性以及缓解月份之间的跳跃性,同时还增加了建模样本量,从而使得预

报方程的连续性和稳定性更好.
构建的呼吸系统疾病逐步回归预报方程见表 10,所有预报方程均通过了 α=0.01 的显著性检验.从预报方程中的组成变量来看,各因子的作用存在一定的滞后效应,主导因素因季节等不同而存在差异.呼吸系统疾病发病人数主要与 CO 浓度、PM_{2.5}、变温与变压成正比,与湿度和平均气温呈反比,意味着遵义市呼吸系统疾病发病更易受干冷空气活动的影响.

表 10 遵义市呼吸系统疾病发病人数全年和四季预报方程
Table 10 The annual and seasonal forecast equations of respiratory diseases in Zunyi City

季节	回归方程	R
年	$Y=162.921+29.599X_{373}+18.842X_{415}+21.782X_{385}-0.278X_{388}-0.665X_{310}+20.371X_{397}-0.594X_{234}$	0.525
春	$Y=145.254-0.635X_{392}+46.920X_{373}-0.725X_{402}+2.196X_{116}-1.914X_{333}+1.392X_{163}+1.297X_{285}$	0.519
夏	$Y=9185.583+84.316X_{409}-60.911X_{203}+51.025X_{202}$	0.656
秋	$Y=83.930+43.860X_{373}-2.340X_{277}+28.586X_{403}-0.434X_{412}+2.504X_{335}+34.970X_{415}+1.60X_{105}$	0.676
冬	$Y=-2003.177+29.896X_{379}-3.223X_{240}+46.416X_{385}-0.354X_{383}-1.299X_{310}+2.384X_{246}+24.192X_{409}$	0.557

对所建立的预报方程分别进行回代和试预报效果优度检验(表 11 和图 11),逐步回归预报方程的

回代预测准确率均在 82%以上,春、秋季节的准确率达 87%以上,同时各项误差指标结果与之保持一致;

在试预报检验中,夏季预测效果最差(P 约为 44.4%), 全年和其他季节的准确率均在 75%以上.

表 11 遵义市呼吸系统疾病预报方程的回代和试预报优度检验
Table 11 The tests for forecast equations of the respiratory diseases

季节	回代				试预报			
	MAE	RMSE	MAPE	P(%)	MAE	RMSE	MAPE	P(%)
全年	22.963	28.662	0.157	85.193	35.59	43.642	0.29	75.825
春季	20.64	26.189	0.133	87.095	34.344	39.671	0.26	76.11
夏季	26.673	33.596	0.183	82.198	62.197	69.913	0.602	44.423
秋季	17.577	22.32	0.131	87.392	34.592	42.417	0.21	78.538
冬季	25.701	30.901	0.161	85.058	37.357	49.155	0.295	78.519

此外,全年和四季预报方程的回代曲线与实测曲线拟合效果良好(图 11),对于 2016 年试预报检验而言,年预报方程结果主要在 9 月份谷值处与实测值存在较大差异,夏季预报方程的曲线拟合效果最差,春、秋和冬季的效果则明显优于全年的.整体上除夏季外,季节效果要优于全年预测效果,因此建议对遵义市呼吸系统疾病发病人数进行季节预报.

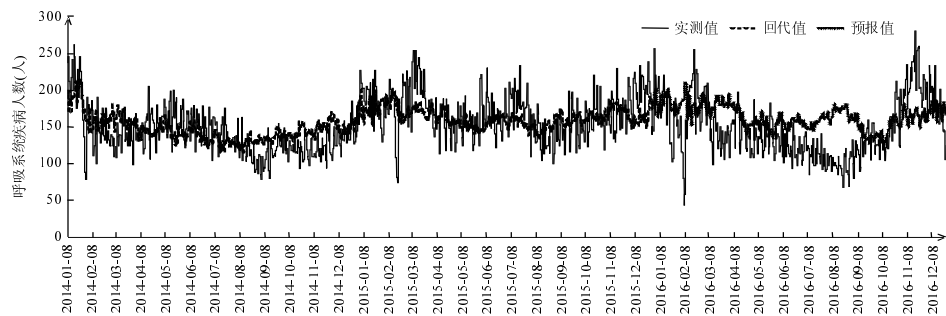
3 讨论

随着“健康中国 2030”战略的提出,展开不同区域气象和空气污染健康效应评估、对战略的实施和气象敏感性疾病预防具有重要意义.同时,我国地域广阔,地貌地形复杂多样,气象条件和空气污染区域性特征差异较大,以往医学气象学研究多集中于京津冀、南京等环境条件变化显著区域,对遵义等地区的健康效应评估较为缺失.本文选取遵义市 2012~2016 年的疾病资料及同时期的环境因子资料,分析了遵义市呼吸系统疾病发病高峰期主要在冬春季,并从 24 节气的角度揭示了立秋到处暑期间的气候环境条件对呼吸系统疾病有一定的气候疗养效应.利用 DLNM、GLM 和 GAM 模型全面的探讨了环境要素对呼吸系统疾病发病的影响及彼此之间的协同作用,并利用逐步回归方法进行了发病人数预

测模型的构建与检验,

从气象要素对遵义市呼吸系统疾病的影响和滞后性来看,本文研究结果与其他不同区域的研究结果具有较好的一致性^[34-37],气温对呼吸系统疾病的影响主要表现为高温即时效应和低温滞后效应,由于遵义市常年高温日数不多,因此对当地而言以低温滞后效应为主.遵义市相对湿度相对较高,当地人群对高湿环境具有较好的适应性,因此当相对湿度偏低时,反而容易引起呼吸系统疾病发病,且以滞后效应为主.综合考虑各气象要素之间的相互作用,从舒适度的角度揭示了冷、热斜胁迫下呼吸系统疾病发病人数明显多于舒适情况,且热强迫下女性发病人数略多于男性,冷强迫下则相反.

在空气污染因子与呼吸系统疾病的暴露-反应关系研究中,除 CO 外,其余污染变量主要以即时效应为主,而研究表明京津冀以及兰州等污染较重区域的污染因子对呼吸系统疾病发病有一定的滞后性^[38-41].这是因为整体上遵义市空气质量优良率很高,人们对污染物浓度的变化更加敏感,当污染物浓度升高时,能在当天就表现出不适,使呼吸系统疾病就诊人数上升,污染物浓度越高危害越大.同时,酸性污染物对呼吸道的刺激较大,其对呼吸系统疾病的影响最显著.



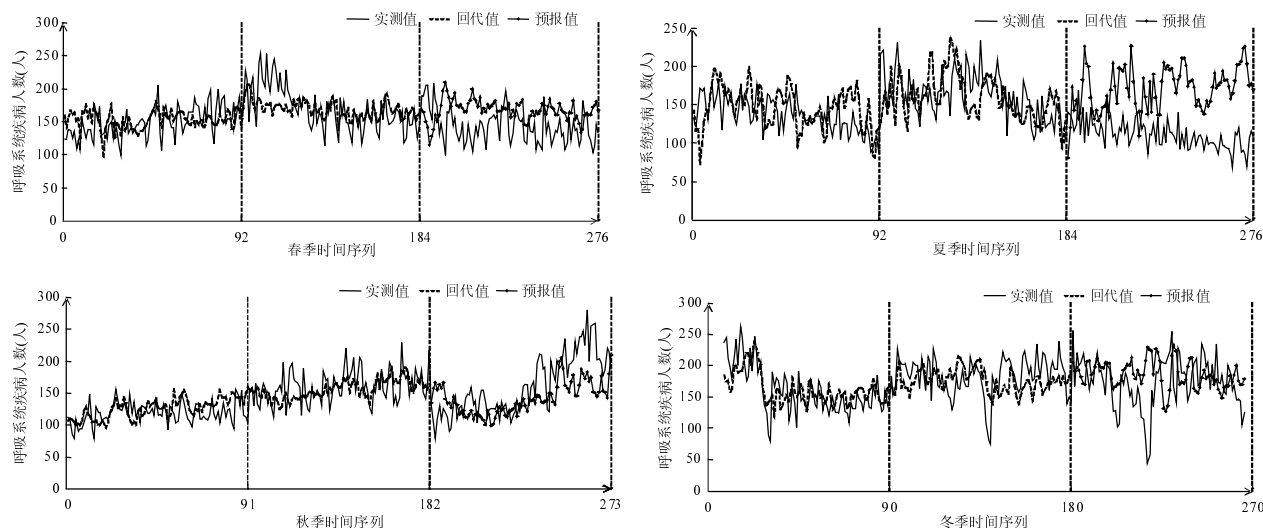


图 11 遵义市呼吸系统疾病预报方程预测值和实测值曲线对比

Fig.11 The comparison of predicted and measured values of the respiratory diseases

气象因子和空气污染因子之间存在紧密联系,一方面附着有毒有害物质的气态污染物可直接进入血液,作用于呼吸系统,另一方面可作为细菌病毒等传播媒介,而气象要素则可通过影响原微生物的生存、繁殖和传播等从而间接诱发疾病,已有证据指出气象要素和大气污染在不良健康效应上可能存在协同作用^[42-43].利用 GAM 模型分析优选,发现在低温、高浓度 NO_2 的条件下,呼吸系统疾病发病人数较多,女性人群为易感脆弱人群;在低湿、高浓度 SO_2 时呼吸系统疾病发病人数最多,且发病人数随着相对湿度减小(或 SO_2 浓度增加)逐渐增加,同时低浓度 SO_2 对下呼吸道感染发病也有显著影响。

最后,建立了遵义市全年和季节呼吸系统疾病发病人数的预测方程,预测值与实测值曲线趋势高度一致,季节效果要优于全年预测效果,故建议对遵义市呼吸系统疾病发病人数进行不同季节预报。

4 结论

4.1 冬春季为遵义市呼吸系统疾病发病高峰期,立秋至处暑前后发病人数最少。

4.2 高温对呼吸系统疾病发病以即时效应为主,低温主要表现为滞后效应,气压和相对湿度则分别以高压和低湿的滞后效应为主,平均风速的影响不大;在最敏感滞后条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 与呼吸系统疾病发病的暴露关系反应曲线呈单调线性分布, SO_2 、 NO_2 和 CO 则呈“J”型分布;低温与高浓度 NO_2 或者低湿

与高浓度 SO_2 的协同作用对呼吸系统疾病发病均有显著影响。

4.3 呼吸系统疾病发病人数的季节预报方程的预报效果显著优于年预报方程的效果。

参考文献:

- [1] Liu L, Breitner S, Pan X, et al. Associations between air temperature and cardio-respiratory mortality in the urban area of Beijing, China: a time-series analysis. [J]. Environmental Health, 2011,10(1):1-11.
- [2] Tang J W, Lai F Y L, Nymadawa P, et al. Comparison of the incidence of influenza in relation to climate factors during 2000~2007 in five countries [J]. Journal of Medical Virology, 2010,82(11):1958-1965.
- [3] 赵立宇,余勇夫,席俊文,等.上海市气温变化对医院儿科日门诊人次的影响 [J]. 中国医院统计, 2010,17(4):313-316.
- [4] Nascimento-Carvalho C M, Cardoso M R, Barral A, et al. Seasonal patterns of viral and bacterial infections among children hospitalized with community-acquired pneumonia in a tropical region [J]. Scandinavian Journal of Infectious Diseases, 2010,42(11/12):839-844.
- [5] 钱孝琳,阚海东.大气颗粒物污染对心血管系统影响的流行病学研究进展 [J]. 中华流行病学杂志, 2005,26(12):999-1001.
- [6] 阚海东,陈秉衡,贾健.大气污染物暴露与人群健康效应的暴露-反应关系分析 [J]. 环境与健康杂志, 2004,21(7):253-254.
- [7] 张莹,王式功,贾旭伟,等.气温与 $\text{PM}_{2.5}$ 协同作用对疾病急诊就诊人数的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(8):3175-3182.
- [8] 王敏珍,郑山,王式功,等.气温与湿度的交互作用对呼吸系统疾病的影响 [J]. 中国环境科学, 2016,36(2):581-588.
- [9] Bleakley H. Disease and development: evidence from hookworm eradication in the American South [J]. The Quarterly Journal of Economics, 2007,122(1):73-117.
- [10] 杜鹏瑞,杜睿,任伟珊.城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展 [J]. 中国环境科学, 2016,36(9):2815-2827.
- [11] 郝吉明,程真,王书肖.我国大气环境污染现状及防治措施研究 [J].

- 环境保护, 2012,(9):16-20.
- [12] 代玉田,于凤英,常 平等.德州市高血压发病气象条件与预报模式[J]. 气象与环境学报, 2012,28(5):79-82.
- [13] Climate change 2007-the physical science basis: Working group II contribution to the Fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge University Press, 2007.
- [14] Climate change 2013-the physical science basis: Working group I contribution to the Fifth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge University Press, 2013.
- [15] http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2015zt/qmttt/20150813/2015041004/201508/t20150813_290458.html
- [16] Michelozzi P, Accetta G, De Sario M, et al. High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2009,179(5):383-389.
- [17] 刘建军,郑有飞,吴荣军.热浪灾害对人体健康的影响及其方法研究[J]. 自然灾害学报, 2008,17(1):151-156.
- [18] Semenza J C, McCullough J E, Flanders W D, et al. Excess hospital admissions during the July 1995 heat wave in Chicago [J]. American journal of preventive medicine, 1999,16(4):269-277.
- [19] Morelli X, Rieux C, Cyrys J, et al. Air pollution, health and social deprivation: a fine-scale risk assessment [J]. Environmental Research, 2016,147:59-70.
- [20] Lin Y K, Chang S C, Lin C S, et al. Comparing ozone metrics on associations with outpatient visits for respiratory diseases in Taipei Metropolitan area [J]. Environmental Pollution, 2013,177:177-184.
- [21] Shen Y, Wu Y, Chen G, et al. Non-linear increase of respiratory diseases and their costs under severe air pollution [J]. Environmental Pollution, 2017,224:631-637.
- [22] 谢元博,陈 娟,李 巍.雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. 环境科学, 2014,35(1):1-8.
- [23] 张 莹.我国典型城市空气污染特征及其健康影响和预报研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [24] Smith K R, Corvalán C F, Kjellstrom T. How much global ill health is attributable to environmental factors? [J]. Epidemiology-Baltimore, 1999,10(5):573-584.
- [25] WHO. International classification of diseases (ICD)-10online [EB/OL].<http://www.who.int/classifications/apps/icd/icd10online//>,2007.1.10.
- [26] 杨 军,欧春泉,丁 研,等.分布滞后非线性模型 [J]. 中国卫生统计, 2012,29(5):772-773.
- [27] Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm [J]. Journal of Statistical Software, 2011,43(8):1.
- [28] Gasparrini A, Armstrong B, Kenward M G. Distributed lag non-linear models [J]. Statistics in Medicine, 2010,29(21):2224-2234.
- [29] 汪建均.基于广义线性模型的变量选择与稳健参数设计 [D]. 南京:南京理工大学, 2011.
- [30] 王式功,马 盼,尚可政等.一种基于黄金分割法构建人体舒适度计算方法 [P]. 中国: 2012105963660,2013-05-15.
- [31] 张志薇.基于舒适度研究的中国大陆健康气候评估 [D]. 兰州:兰州大学, 2014.
- [32] Kan H, Chen B, Hong C. Health impact of outdoor air pollution in China: current knowledge and future research needs [J]. Environmental Health Perspectives, 2009,117(5):A187.
- [33] Dominici F, Daniels M, Zeger S L, et al. Air pollution and mortality: estimating regional and national dose-response relationships [J]. Journal of the American Statistical Association, 2002,97(457):100-111.
- [34] 李 娟,张志薇,于庚康,等.气象要素对南京市呼吸系统疾病的影响研究 [J]. 气象科学, 2017,37(3):409-415.
- [35] González S, Díaz J, Pajares M S, et al. Relationship between atmospheric pressure and mortality in the Madrid Autonomous Region: a time-series study [J]. International Journal of Biometeorology, 2001,45(1):34-40.
- [36] Díaz J, García R, Lopez C, et al. Mortality impact of extreme winter temperatures [J]. International Journal of Biometeorology, 2005,49(3):179-183.
- [37] 马 盼,王式功,尚可政,等.气象舒适条件对呼吸系统疾病的影响 [J]. 中国环境科学, 2018,38(1):374-382.
- [38] 马 盼,李若麟,赵笑颜,等.北京市空气质量指数与气象条件的关系及其对呼吸系统疾病的滞后影响 [J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2017,53(3):388-393.
- [39] 张 莹,邵 毅,王式功,等.北京市空气污染物对呼吸系统疾病门诊人数的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(9):2401-2407.
- [40] 吴 或,张衍桑,刘 玲,等.郑州市空气污染对每日门诊人次影响的滞后效应和收获效应 [J]. 环境与健康杂志, 2011,28(3):233-237.
- [41] 陶 燕,羊德容,兰 岚,等.兰州市空气污染对呼吸系统疾病入院人数的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 175-180.
- [42] Green R S, Basu R, Malig B, et al. The effect of temperature on hospital admissions in nine California counties [J]. International Journal of Public Health, 2010,55(2):113-121.
- [43] 伍燕珍,张金良.北京市大气颗粒物与温度对人群非意外死亡影响的交互作用 [J]. 环境科学研究, 2009,(12):1403-1410.

作者简介: 乐 满(1992-),女,湖北咸宁人,硕士,主要从事气象环境与健康研究.发表论文 2 篇.